

KÜBİK BİRİM KİRAL HÜCRENİN MEKANİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Cem YILMAZ* 
İlyas KACAR** 

Alınma: 26.03.2025 ; düzeltme: 19.06.2025 ; kabul: 29.06.2025

Öz: Bu çalışmada, kiral kafes yapılarında sıklıkla kullanılan bir birim hücre tetkik edilmiştir. Hücredeki giriş elemanların kesiti dairesel olup, malzeme olarak titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) ele alınmıştır. Bir uca eksenel yer değiştirmeye uygulanmışken diğer uç ise ankastre türünde mesnetlenmiştir. Yapısal etüt için sonlu elemanlar metoduna sahip bir simülasyon kullanılmıştır. Simülasyon neticesinde Poisson oranı ve gerilme değerleri hesaplanmıştır. Poisson oranı ve gerilme değerleri, çıkış parametresidir. Hücre girişlerinin yarıçapı ve uygulanan eksenel yer değiştirme de giriş değişkenleridir. Giriş ve çıkışlar, genetik algoritma esaslı bir optimizasyona tabi tutulmuştur. Gayeler, yer değiştirmenin ve dayanımın en büyük olanını tespit etmektir. Zira hafif yapılar maliyet ve dayanımları cihetiyle tercih edilmektedir. Ele alınan birim hücre, aslen muntazam bir kübik birim hücrenin onuncu burkulma moduna tekabül etmektedir. Netice itibarıyla, gayelere mutabık en uygun ebât tayin edilmiştir. Bununla beraber, parametreler arasındaki ilişkileri veren bir cevap fonksiyonu da elde edilmiştir. Optimum kesit yarıçapı 11,1 mm olarak belirlenmiştir. Bu şekliyle yapının kütlesi 638,95 gramdır. Kafes, 486,51 MPa gerilmeye dayanabilmektedir. Poisson oranı ise ende -0,00349 ve genişlikte -0,715 olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elamanlar yöntemi, Kiral ökzetik hücre, Optimizasyon, Ti-6Al-4V

Investigation of the Mechanical Behaviour of a Cubic Chiral Unit Cell

Abstract: In this study, a unit cell frequently used in chiral lattice structures is examined. The cross-section of the beam elements in the cell is circular and titanium alloy (Ti-6Al-4V) is considered as the material. One end is subjected to axial displacement while the other end is fix supported. A simulation employing the finite element method has been utilized for the structural analysis. In the simulation, Poisson's ratio and stress are calculated. Poisson's ratio and stress are output parameters. Beam's cross-sectional radius and the applied axial displacement are input variables. The inputs and outputs are used for optimization based on a genetic algorithm. Objectives are to achieve maximum of displacement and strength as lightweight structures are preferred due to their cost and strength advantages. Investigated unit cell corresponds to the tenth buckling mode of a regular cubic unit cell. Consequently, optimum dimensions are determined considering the objectives. Additionally, a response function describing the relationships among parameters is obtained. Optimum cross-sectional radius is determined as 11.1 mm. In this configuration, the structure's mass is 638.95 grams. The lattice endurances a stress of 486.51 MPa. Poisson's ratio is -0.00349 in the transverse direction and -0.715 in the width.

Keywords: Finite elements method, Chiral auxetic cell, Optimization, Ti-6Al-4V

*Cem Yılmaz, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

**İlyas Kacar, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

İletişim Yazarı: İlyas Kacar (ikacar@gmail.com ikacar@ohu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Kiral kafes şekilleri, başlangıçta kimyasal moleküllerin sınıflandırılmasında kullanılmakta iken günümüzde mekanik yapısal elemanlar olarak da önem kazanmıştır. Bu yapılar, yüksek deformasyonlara ve titreşimlere direnç gösterebilmekte olup üç boyutlu kolon, kiriş dizilimleri ile elde edilmektedir. Asimetrik biçimleri nedeniyle meta-malzeme tasarımları ve ileri üretim teknikleri için uygundur. Kiral kafes yapılar, hızlı kurulum ve taşınabilirlik avantajları sunmakta; dayanıklı malzemelerden üretildikleri için zorlu çevresel faktörlere karşı direnç sergilemektedir. Ayrıca, mekanik problemlere çözüm üretme potansiyeli taşımaktadır. Eşsiz özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir.

Pozitif değerlerden negatif değerlere geçiş yapabilen Poisson oranına sahip izotropik kiral kafesler geliştirilmiş olup, bu yapıların analizi sonlu eleman yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Ha ve diğ., 2016). Ti-6Al-4V alaşımından üretilen kiral yapının Poisson oranı deneysel olarak modellenmiştir (Novak ve diğ., 2022). Kiral kafesler Cosserat mekaniği ile incelenmiş, parçacıklar arası bağlantılar yay benzetimi ile temsil edilmiş ve Poisson oranı hesaplanmıştır (Vasilev ve Pavlov, 2021). Periyodik kiral kiriş-kafeslerin akustik davranışı ise ayırık Lagrangian yöntemi ile analiz edilmiştir (Sulis ve diğ. 2022). Kiral yapıların fononik özellikleri Bloch teoremi kullanılarak incelenmiş ve küresel kafeslerin akustik dalga aralıklarının, meta malzeme tasarımlarında potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir (Spadoni ve diğ., 2009). Gelişmiş bir kompozit kiral kafes yapı içerisinde şok dalgası yayılımının sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edildiği bildirilmiştir (Liu ve diğ. 2012). Bu çalışmada plaka yarıçapı belli bir değerde iken en geniş ilk bant aralığının elde edilebildiği sonucuna varmışlardır. Mikropolar elastisite teorisi ile kiralite özellikleri analiz edilmiş, 2B izotropik modellere indirgenmesi durumunda kiral davranışın kaybolduğu tespit edilmiştir. Bu sorunu çözmek için 2B kiral katıların etkilerini modelleyen bir süreklilik sistemi geliştirilmiştir. Metalik nanoparçacık dizilerinde yüzey plazmon rezonanslarının toplu uyarımı incelenmiş ve kiral yapıların rezonans frekans aralıklarının kafes serbestlik derecelerindeki değişimle ilişkili olduğu gösterilmiştir (Cerdán ve diğ. 2023). Modifiye edilmiş kiral moleküllerin adsorpsiyonu ile üç farklı kiral yapı tipi sunulmuş ve atomik düzeydeki analizler gerçekleştirilmiştir (Kim ve diğ. 2023). Kiral yapıların simetri sınırlamaları ve uzay grupları, Hausdorff mesafeleri ile sınıflandırılmıştır (Fecher ve diğ. 2022).

Ökzetik kafes yapıların Poisson oranı üzerindeki geometrik iç kalınlık etkisi incelenmiş ve 4,9 mm iç kalınlığa sahip 4x2 kafes yapısının -0,55 gibi en düşük Poisson oranını sergilediği belirtilmiştir (Türkoğlu ve diğ. 2024). Örme spor giyimde kişisel koruma sağlamak amacıyla helisel ökzetik ipliklerin yapısal ve performans analizi gerçekleştirilmiştir (Noori ve diğ. 2019). Taguchi yöntemi ile silindirik sandviçlerin enerji emme performansı optimize edilmiş; kabuk ve çekirdek kalınlığının kritik rol oynadığı vurgulanmıştır (Süvari ve diğ. 2021). Otomotiv tamponlarında yapısal malzeme olarak ökzetik çekirdekli sandviç kompozitlerin kullanılması hâlinde, yapılar arası mesafe değiştikçe, mukavemet ve darbe Emilimi değişmektedir. Bostancıoğlu ve Kacar (2024) ise Ti-6Al-4V alaşımlı, kiral kafes yapının optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Hücre kirişlerinin çap ve eksenel yer değiştirme parametreleri optimize edilmiş, cevap yüzey fonksiyonları oluşturulmuştur. Çap ≈ 1 mm; yer değiştirme $\approx 0,12$ mm olduğunda kafes, 266 MPa çekme ve 233 MPa basma gerilmelerine dayanabilmektedir. Her iki değer de Ti-6Al-4V alaşımının akma sınırının altındadır. Ağırlık yalnızca $\sim 0,455$ g olup ilk hâle göre %90 azalma elde edilmiştir. Optimum ebâdı, üretilebilir toleransları gözeterek önermişlerdir. Cevap yüzeyi fonksiyonları sayesinde parametre etkileşimini güvenilir şekilde temsil etmişlerdir. Yılmaz ve Kacar (2024) dikdörtgensel kesitli kiral ökzetik kafesin PE, Ti-6Al-4V, AlSi10Mg, SS316, PA6, PP, nylon malzemelerinden üretilmesi hâlinde optimum çap değerini araştırmışlardır. Optimum en/boy oranı 0,5/0,2 mm iken bu yapıya $-0,9$ mm yer değiştirme uygulandığında yapıda yalnızca $\sim 23,6$ MPa gerilme oluşmuştur. Ağırlık $\sim 0,298$ g olup kompakt ve hafif yapılar olarak öne çıkmaktadır. Uygulanan genetik algoritma, malzeme/geometri/mekanizma ilişkisinde etkili çözümler sağlamaktadır. Kırar (2025) re-entrant

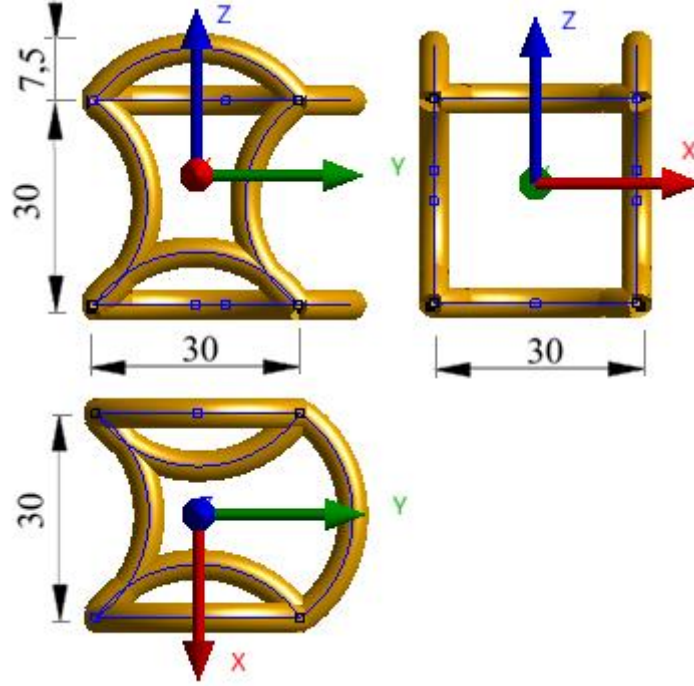
(içe çökük) ökzetik kafes yapının çekme yükü altındaki davranışını incelemiştir. Hem orijinal hem de şekilsel olarak modifiye edilmiş biçimlerin yanı sıra tasarımın boyutlarının %30 artırılıp azaltılmasının etkilerini karşılaştırmalı olarak araştırmayı amaçlamıştır. ANSYS® ile sonlu eleman yöntemi kullanılarak, 20 N'luk çekme yükü altında statik yapısal analizler yapılmıştır. Değerlendirilen kriterler, eksenel uzama, enine genişleme, Von Mises eş-değer gerilme, Poisson oranıdır. Şekilsel değişime uğrayan tasarımda, orijinaline kıyasla daha yüksek Von Mises gerilme değerleri elde edilmiştir (örn. modifiye: ~177 MPa ve orijinal: ~169 MPa). Modifiye tasarımda, enine genişlemede ciddi artış gözlenmiştir (modifiye: 0,142 mm ve orijinal: 0,088 mm). Bu da daha güçlü negatif Poisson etkisine yol açmıştır. İki yapı arasında fark az olup modifiye tasarım biraz daha fazla uzama göstermiştir (~0,407 mm vs. ~0,400 mm). Yapı boyutları küçültüldüğünde Poisson oranı artmış, büyütülünce azalmıştır. Ölçek küçültme, olumlu mekanik davranış etkisi göstermiştir. Ölçeğin küçültülmesi sayesinde yapının Poisson oranı iyileşmiş, daha etkili mekanik performans (deformasyon ve enerji emilimi) elde edilmiştir. Modelleme ve simülasyon sonuçları, tasarım esnasında ölçek ve geometri değişiminin, kritik yapı özelliklerini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Kafes yapı tekniklerinin, iç gövdelerin topoloji optimizasyonu süreçlerine entegrasyonu mümkün hâle gelmiştir. Literatürde, ökzetik ipliklerle dokunan kumaşların çekme mukavemeti ve termal direnç gibi mekanik özellikleri iyileştirdiği gösterilmiştir. Benzer şekilde, 3B baskı ile üretilen modifiye metal ökzetik yapılar, negatif Poisson oranı sayesinde kesme mukavemeti ve enerji emiliminde anlamlı artış sağlamaktadır. AlSi10Mg alaşımıyla üretilen kafes yapılarda, birim hücre yüksekliğinin balistik performans üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu rapor edilmiştir. Ticari lastiklerle karşılaştırıldığında, bu kafes yapıların üstün mekanik özellikler sergilediği de çalışmalarda vurgulanmaktadır. Özellikle küp-oktahedron tipindeki kafesler, eklemeli imalatla üretildiklerinde yüksek yapısal mukavemet sunmaktadır. Ayrıca, gemi yapımında kullanılan kompozit malzemelerin operasyonel ömrünün kafes yapılarla desteklenerek uzatılabildiği literatürde belirtilmektedir.

Literatürde kiral kafes tasarımlarının yapısal optimizasyonuna yönelik pek çok çalışma mevcut olmakla birlikte, kiral tasarım ile ökzetik özelliklerin entegrasyonu ve bu kombinasyonun Poisson oranı, kesme modülü ve enerji emilimi üzerindeki etkileri henüz kapsamlı bir şekilde araştırılmamıştır. Bu çalışma, kübik kiral kafes içeren yapılardaki, bir birim hücrenin, optimal boyutlarını yapısal simülasyon ve genetik algoritma yöntemleri ile belirlemeyi amaçlamaktadır. Parametreler arası korelasyonlar, cevap yüzey fonksiyonu ile modellenmiş olup, Latin hiperküp örnekleme ve Kriging tekniği kullanılarak tasarım noktaları optimize edilmiştir. Müteakip bölümde yapısal analiz ve optimizasyon esasları detaylandırılmakta, üçüncü bölümde sonuçlar ve değerlendirmeler sunulmaktadır. Bu çalışma kiral kafes yapıların yapısal optimizasyonu alanında özgün bir yaklaşım sunmakta ve literatürde eksikliği hissedilen kiral-ökzetik entegrasyonuna dayalı mekanik analizler için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Elde edilen bulgular, ileride farklı malzeme türleri ve dinamik yükleme senaryoları altında yapılacak deneysel ve sayısal çalışmalara ışık tutacak niteliktedir.

2. MATERYAL VE METOD

Şekil 1'de bu çalışmada kullanılan hücre geometrisi gösterilmiştir. Bu geometri, literatürde sıklıkla karşılaşılan modellerden birine karşılık gelmektedir. Temelde, düzgün bir kübik birim hücrenin 10. burkulma modu ile uyumlu olarak tasarlanmıştır. 10. modun tercih edilmesinin temel nedeni, bu modun yapıya özgün bir burkulma karakteristiği kazandırması ve daha yüksek mertebedeki modların simetrik olmayan, dolayısıyla kiral davranışa daha yakın deformasyon şekilleri üretmesidir. Düşük mertebeli (örneğin 1–3) burkulma modları genellikle dönme veya öteleme yer değiştirmelerini içerirken, 10. mod gibi daha yüksek düzeyli modlar, birim hücre içinde dönel bileşenlerin öne çıktığı karmaşık bir deformasyon deseni sunmaktadır. Bu durum, kiral kafes yapılarda hedeflenen dönme-kuvvet çiftleri ve negatif Poisson etkisinin daha etkin şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla, yapı geometrisinin 10. burkulma modu ile

uyumlu tasarlanması, hem teorik modellemeye hem de yapının fonksiyonel davranışına katkı sunmaktadır. Hücre kirişleri sinüzoidal formda bir eğrilığe sahip olup, düğüm noktalarında birbirleriyle birleşiktir. Yapı tamamen tek bir hücreden oluşmakta olup, her hücre 30 mm yatay, 30 mm dikey ve 30 mm yüksekliğe sahiptir. Sinüzoidal eğriliklerin genliği 7,5 mm olarak belirlenmiş, kiriş kesiti ise başlangıçta 1,5 mm çapında dairesel bir profil olarak tanımlanmıştır. Bu parametrelerle yapının toplam hacmi 2649 mm³ ve kütlesi 11,668 g olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1:
Çalışmada ele alınan kiral hücre boyutları (mm)

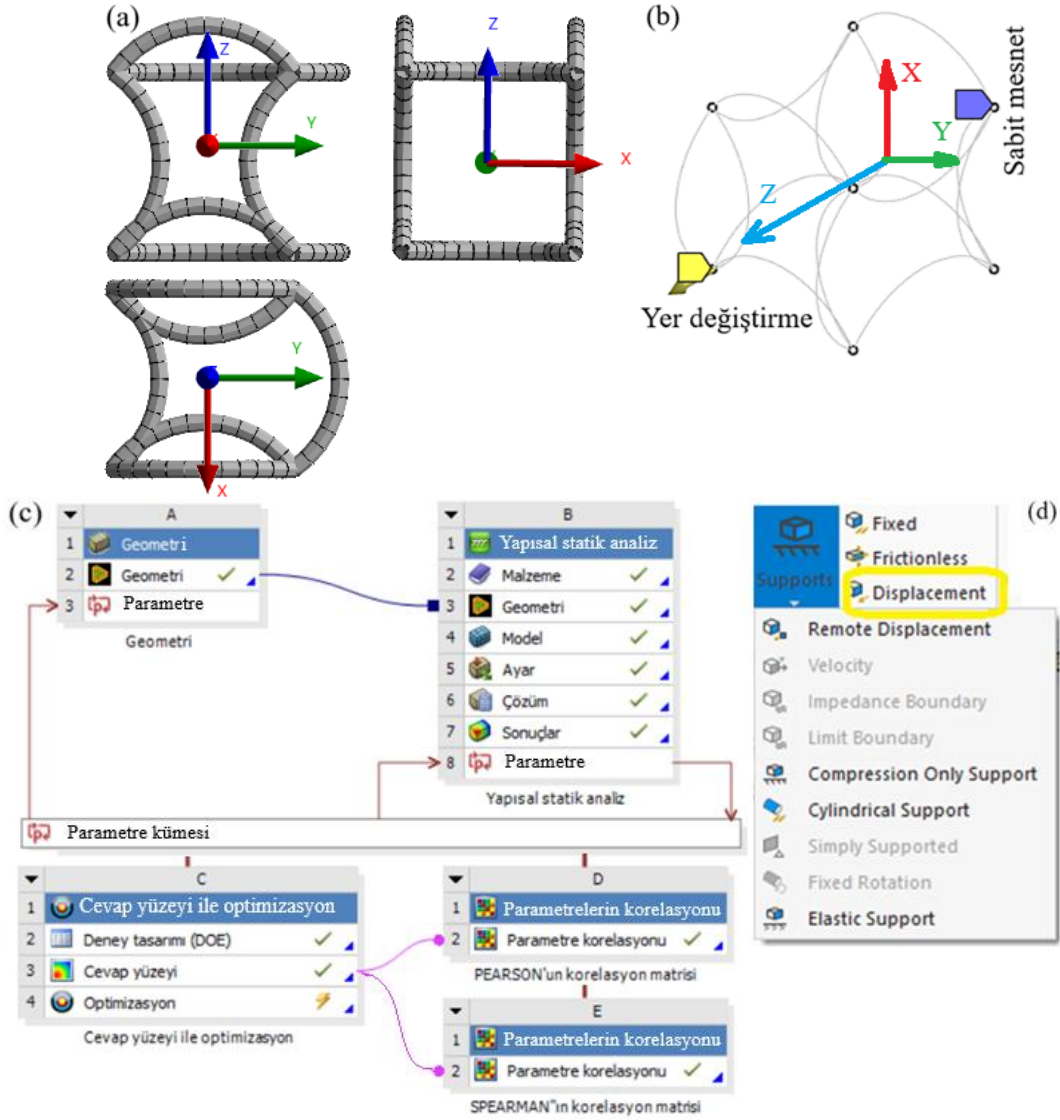
Malzeme olarak Ti-6Al-4V kullanılmış olup özellikleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri (oda sıcaklığında) (Yılmaz ve Kacar, 2024)

Özellik	Ti-6Al-4V
Yoğunluk (kg/m ³)	4620
Basmadaki maksimum dayanım (MPa)	970
Basmadaki akma dayanımı (MPa)	950
Akma mukavemeti-çekmede (MPa)	880
Maksimum dayanım-çekmede (MPa)	950
Young's modülü (GPa)	96
Poisson oranı (izotropik iken)	0,36
Kayma modülü (GPa)	35,294

Hesaplama için yapısal simülasyon ve uygun ebât tayini için de optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Simülasyonlar Ansys© yazılımı ile gerçekleştirilmiş olup, Şekil 2'de belirtilen yük ve sınır koşulları uygulanmıştır. Hücrenin bir yüzüne, "ankastre mesnet" türünde bir sınır koşulu tanımlanmışken, tam karşı yüze 0 ile -6 mm aralığında rampa fonksiyonu biçiminde eksenel yer değiştirme uygulanmıştır. Sonlu eleman (SE) yöntemi gereği geometri ayrıklaştırılmış, bu amaçla lineer şekil fonksiyonlu ve tam entegrasyonlu kiriş elemanları tercih edilmiştir. Hem ağ yapısından bağımsız hem de hesaplama süresi açısından hızlı olan denge noktası, 400 düğüm noktası ve 208 eleman içeren bir ağ olmuştur. Konumsal ayrıklaştırma ile elde edilen her bir birime eleman ve bu birimlerin köşe koordinatlarına ise düğüm noktası denmektedir. Eleman kalitesinin bir ölçütü olan çarpıklık, en fazla sıfır, diğer bir ölçüt olan ortogonal kalite ise tamamen

1 değerindedir. Simülasyon sonucunda Poisson oranı (ν) ve gerilme (σ) hesaplanmıştır. Poisson oranı hem genişlikte hem de end e hesaplanmıştır.



Şekil 2:

Hücrenin (a) SE modeli, (b) deplasman yükü ve ankastre mesnet sınır koşulları, (c) yazılım proje şeması, (d) deplasman yükünün uygulaması

Tablo 2'de giriş ve çıkış olarak belirtilen değişkenlerin tamamı, optimizasyon için karar değişkenleridir, "tasarım değişkenleri" olarak da adlandırılmaktadır.

Tablo 2. Giriş değişkenlerinin başlangıç değerleri ve limitleri

Değişkenler (GİRİŞ)	İlk değer	Alt limit	Üst limit
Kesit çapı (mm)	1,5	11	300
Uygulanan eksenel yer değiştirme (mm)	6	-3	3
Değişkenler (ÇIKIŞ)			
Gerilme (MPa)	486,51	--	--
ν_{en}	-0,0025513	--	--
$\nu_{genişlik}$	-0,52401	--	--

Giriş parametrelerinin başlangıç değerleri, alt ve üst sınırları çizelgede sunulmuştur. Çıkış parametrelerinin alabileceği değer aralıkları ise şimdiden bilinmemekte olup, cevap yüzeyi olarak adlandırılan model sayesinde elde edilebilecektir. Cevap yüzeyi ise bu çalışmanın temel araştırma hedeflerinden birini oluşturmaktadır. Belirtilen aralıklar içerisinde, Latin Hiperküp Yöntemi'nin dağılım şeması kullanılarak toplam 1000 adet tasarım noktası (DP) oluşturulmuştur. Yapılan hesaplamalar sonunda bu noktaların tamamının hesaplanabildiği tespit edilmiştir. Hesaplamalar sonucunda, değişkenler arasındaki ilişkiler "cevap yüzeyi" olarak adlandırılan bir fonksiyon yardımıyla belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde, "11 mm hedeflenen yarıçap", "maksimum dayanım" ve "maksimum yer değiştirme" koşulları "amaç fonksiyonları" olarak tanımlanmıştır. Optimize edici olarak *genetik algoritma* yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, birden fazla hedef ve kısıtı destekleyerek en uygun çözümü bulmayı amaçlayan bir optimizasyon algoritmasıdır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1. Poisson Oranı

Başlangıçta hücrenin bir ucu ankastre mesnet ile sabitlenmişken diğer ucuna Z eksen doğrultusunda $-9,13 \times 10^{-2}$ mm kadarlık basma yer değiştirmesi uygulanmıştır. Bu değer seçilirken yapıda plastik deformasyon oluşmaması esası gözetilmiştir. Tüm analizler 32 GB RAM ve 2,30 GHz frekanslı ve çekirdek sayısı 16 olan bir işlemciye sahip bir bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplamaya ilişkin istatistiksel veriler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Simülasyonda yapılan hesaplamaya ilişkin istatistik

Özellik	Değer
1000 DP için toplam hesaplama süresi (s)	4000
MAPDL geçen süre (s)	4
MAPDL sonuç dosyası boyutu (MB)	1,625
Kullanılan MAPDL bellek (MB)	189

Başlangıç değerleri kullanılarak yapılan simülasyonda, eksenel doğrultuda $-9,13 \times 10^{-2}$ mm basma deplasmanı sonucunda, yapıda yanıl daralma değeri $-3,195 \times 10^{-4}$ mm ve boyuna kısalma değeri $-6,5631 \times 10^{-2}$ mm kadardır. Yük yokken en ve boy 30 mm uzunluğundadır. En, genişlik ve boy ifadeleri, Şekil 2b'de gösterilmiş olup sırası ile X, Y ve Z doğrultularına karşılık gelmektedir. Bu durumda endeki şekil değiştirme değeri Denklem (1) ile hesaplanabilecektir.

$$\varepsilon_{yanal-en} = \frac{-3,1954 \times 10^{-4} \text{ mm}}{30 \text{ mm}} = -0,000010651 \quad (1)$$

Boyca şekil değiştirme Denklem (2) ile hesaplanabilecektir.

$$\varepsilon_{yanal-genişlik} = \frac{-6,5631 \times 10^{-2} \text{ mm}}{30 \text{ mm}} = -0,0021877 \quad (2)$$

Eksenel şekil değiştirme ise Denklem (3) ile hesaplanabilecektir.

$$\varepsilon_{eksenel} = \frac{9,1307 \times 10^{-2} \text{ mm}}{30 \text{ mm}} = 0,00304357 \quad (3)$$

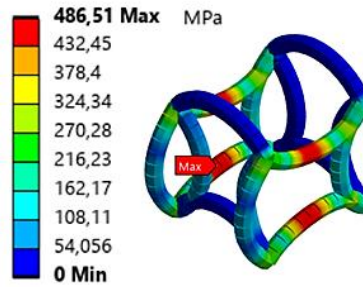
Sonuçta, endeki Poisson oranı Denklem (4) ile hesaplanabilecektir.

$$\nu_{en} = -\frac{-\varepsilon_{yanal}}{-\varepsilon_{eksenel}} = -0,0035 \quad (4)$$

Genişlikteki Poisson oranı Denklem (5) ile hesaplanabilecektir.

$$\nu_{genişlik} = -\frac{-\varepsilon_{genişlik}}{-\varepsilon_{eksenel}} = -0,719 \quad (5)$$

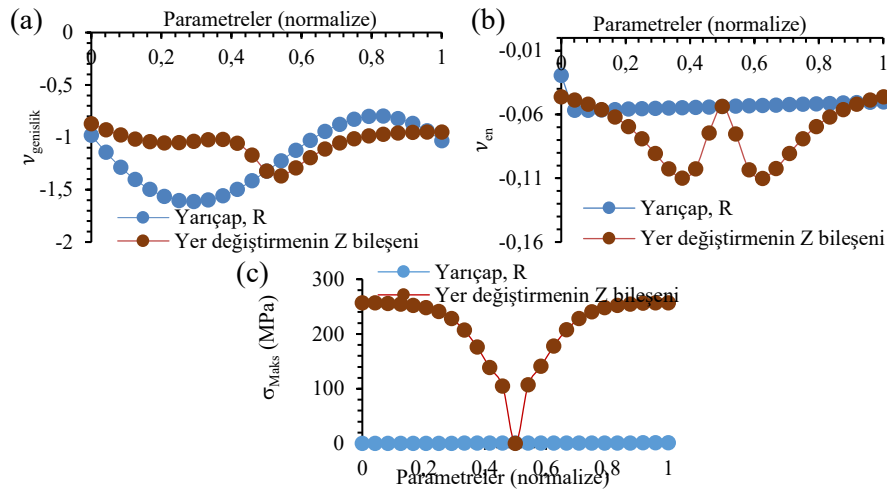
Poisson oranının negatif değere sahip olması, hücrenin ökzetik davrandığını göstermektedir. Şekil 3'te verildiği üzere, yapıda 486,51 MPa değerinde eksenel gerilme meydana gelmektedir. Kullanılan Ti-6Al-4V malzemesinin basma akma dayanımı 950 MPa, çekme akma dayanımı ise 880 MPa olup hesaplanan gerilme değerleri, bu sınırların altındadır.



Şekil 3:
Hücredeki gerilme dağılımı

3.2. Cevap Eğrisi

Cevap eğrisi fonksiyonu olarak adlandırılan ve Şekil 4'te verilmiş olan ilişkiler sayesinde, hücre tasarımında, değişkenlerin birbirlerini nasıl etkilediği tespit edilebilmiştir. Bu eğriler bir tasarımcı için kıymetli grafiklerdir. Zira ilk bakışta giriş değişkenlerinin değişmesi ile çıkış değişkenlerinin nasıl değişeceği görülebilmektedir. Parametreler, 0 ile 1 aralığında normalize edilmiştir.



Şekil 4:

Cevap fonksiyonu sayesinde kesit yarıçapı ve yer değiştiririnin Z bileşeninin (a) $\nu_{genişlik}$, (b) ν_{en} ve (c) maksimum gerilme ile olan ilişkilerinin elde edilmesi

Şekilde üç adet grafik ve her birinde ikişer adet eğri bulunmaktadır. Bu grafikler sırası ile $v_{genişlik}$, v_{en} ve gerilme çıktılarının, R (kesit yarıçapı) ve eksenel yer değiştirme (yer değiştirmenin Z bileşeni) girdileri ile olan ilişkilerini vermektedir. Eğriler, cevap yüzey fonksiyonundan elde edilen yerel hassasiyet sonuçlarını yansıtmaktadır. Buna göre değişkenlerin ilişkileri şu şekildedir:

Şekil 4 (a) incelendiğinde, $v_{genişlik}$ değerlerinin R ve eksenel yer değiştirme ile birlikte nasıl farklılaştığı gözlemlenmektedir. Mavi eğri (yarıçap, R) düşük değerlerde daha belirgin bir azalma eğilimi sergilemekte, orta değerlerde ise görece artış göstermektedir. Turuncu eğri (eksenel yer değiştirme) ise özellikle normalize edilmiş parametrelerin ortalarına yakın bölgede daha güçlü bir etkilenme ortaya koymaktadır. Bu durum, $v_{genişlik}$ çıktısının özellikle belirli bir yer değiştirme aralığında daha duyarlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 4 (b) incelendiğinde, v_{en} çıktısının R ve eksenel yer değiştirme girdilerine karşı hassasiyeti takip edilmektedir. Mavi eğrinin (yarıçap, R) seyri nispeten daha sabit kalmaktayken, turuncu eğrinin (eksenel yer değiştirme) belirli normalleştirilmiş parametre değerlerinde dalgalanma yaptığı gözlemlenmektedir. Bu dalgalanmalar, v_{en} 'in eksenel yer değiştirmede meydana gelen küçük artışlara dahi hızlı tepki verebildiğini düşündürmektedir.

Şekil 4 (c) ise maksimum gerilme değerlerinin her iki girdi ile ilişkisini göstermektedir. Mavi eğri (yarıçap, R) artan parametre değeri boyunca görece düzenli bir seyir izlemekte, ancak turuncu eğri (eksenel yer değiştirme) bazı normalize değerlerde oldukça yüksek pikler yapmaktadır. Bu pikler, yer değiştirme değerinin belirli bir aralıkta makas etkisi oluşturarak gerilmenin çok daha düşük seviyelere inmesine neden olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla gerilmenin, geometrik boyuttan (yarıçaptan) daha çok eksenel yer değiştirme miktarına duyarlı olduğu anlaşılmaktadır.

Tüm bu grafikler bir arada değerlendirildiğinde, Poisson oranı ile maksimum gerilme gibi çıktılarda eksenel yer değiştirme girdisinin zaman zaman daha baskın bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan, yarıçapın da belirli aralıklarda anlamlı etki oluşturduğu söylenebilmektedir. Bu bulgular, ilgili tasarım değişkenlerinin (kesit yarıçapı ve eksenel yer değiştirme) malzeme ve geometri açısından hangi bölgelerde kritik etkiye sahip olduğunu netleştirmekte ve bu sayede hassasiyet analizlerinde (local sensitivity) hangi parametrelerin öncelikli ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Cevap eğrileri fonksiyonunun başarımını değerlendirmek için determinant katsayısı, R^2 , hatanın karesinin ortalamasının karekökü, RMSE ve mutlak hatanın ortalaması, MAE, gibi hata metrikleri kullanılmaktadır. R^2 , modelin veri setini ne kadar iyi açıklayabildiğini ifade ederken, RMSE ve MAE, gerçek değerler ile modelin tahmin ettiği değerleri arasındaki hatayı ölçmektedir. Hata değerleri ne denli sıfır veya sıfıra yakınsa o fonksiyonun iyiliği o denli artmaktadır. Bu çalışmada elde edilen cevap fonksiyonunun iyilik ölçütleri Tablo 4'teki gibidir.

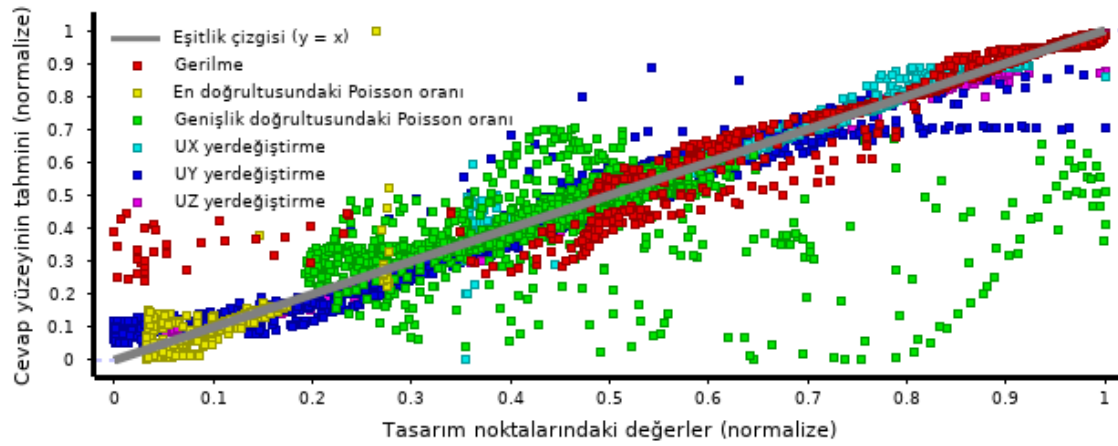
Tablo 4. Cevap fonksiyonunun iyilik metrikleri

Değişkenler	R^2	RMSE	MAE	Maksimum	Minimum
Poisson oranı-en	0,97203	0,007256	0,0085	0,294	-0,113
Poisson oranı-genişlik	0,9987	0,00458	0,00357	-1,629	-0,618
Gerilme (MPa)	0,9128	4,5898	14,178	2617,79	629,48

Çizelgeye göre, Poisson oranı için R^2 değeri 0,97203 olup buradan anlaşılmıştır ki, model, bağımlı değişkendeki varyansın % 97,02'sini açıklamıştır. Ayrıca, RMSE değeri 0,007256 ile oldukça düşük bir hata miktarı ortaya koyarken, MAE değeri 0,00357 ile neredeyse sıfır hataya ulaşılmış olduğunu göstermektedir. Maksimum gerilme için R^2 değeri 0,9128 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, model, bağımlı değişkendeki varyansın %91,28'sini açıklamış olduğu anlamına gelmektedir. Ancak, RMSE = 4,5898 ve MAE = 14,178 değerleri, modelin hata miktarının bu parametre için biraz daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. Ancak gerilmenin aldığı değer aralığının 629,48 MPa ve 2617,79 MPa olduğu dikkate alındığında bu değerlerin de nispeten düşük olduğu anlaşılabacaktır. Genelde R^2 değerinin 0,71-0,99 arasında olması, modelin, bağımlı değişkendeki varyansın %71-99'unu açıkladığı anlamına gelmektedir. RMSE ve

MAE'nin sıfıra yaklaşması, modelin genel başarımının arttığını ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle Poisson oranı parametresi için modelin oldukça başarılı bir performans sergilediğini, ancak maksimum gerilme parametresi için iyileştirme yapılabileceğine işaret etmektedir.

Şekil 5'te ise regresyon analizine dair grafik verilmiştir. Regresyon analizi, bağımlı bir değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak modelleyen istatistiksel bir yöntemdir. Bu analiz sayesinde, girdiler (burada tasarım değişkenleri) kullanılarak çıktılar (burada gerilme, yer değiştirme, Poisson oranı) tahmin edilmesi sağlanmaktadır. Özellikle mühendislikte, sayısal simülasyonlardan elde edilen veri setlerinin temsil gücünü test etmek amacıyla regresyon analizi kullanılmaktadır. Bu bağlamda, tahmin edilen sonuçların doğruluğu genellikle "eşitlik çizgisi ($y = x$)" etrafındaki dağılımla değerlendirilmektedir. Noktaların bu çizgi civarına yakınlaşması, tahminin de gerçek değere yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 5:
Regresyon analizi

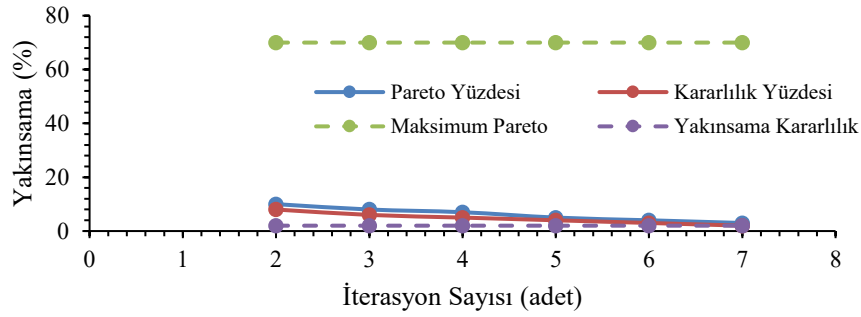
Yatay eksen, normalize edilmiş tasarım noktalarındaki gerçek değerleri, dikey eksen ise cevap yüzeyi modeli tarafından tahmin edilen (normalize) değerleri temsil etmektedir. Gerilme kırmızı kareler ile gösterilmiş olup noktalar genel olarak çizgiye yakın seyretmekte ve bu suretle de modelin gerilme tahmininde oldukça başarılı olduğu gözlemlenmektedir. En doğrultusundaki Poisson oranı (yeşil kareler) için daha geniş bir yayılım gözlemlenmekte, yani tahmin doğruluğu diğer değişkenlere göre daha düşüktür. Bu durum, bu yöndeki Poisson oranının modellenmesinin daha karmaşık olduğunu göstermektedir. Genişlik doğrultusundaki Poisson oranı – açık mavi kareler- orta derecede yayılım sergilemekte olup tahmin başarısı orta düzeydedir. UX, UY, UZ yer değiştirme bileşenleri (mavi, lacivert, mor kareler) genellikle eşitlik çizgisine yakın kümelenmiştir, bu da cevap yüzeyi modelinin yer değiştirme tahminlerinde yüksek doğruluk sunduğunu göstermektedir. Genel olarak tüm değişkenler için modelin tahmin doğruluğu oldukça yüksektir. Özellikle gerilme ve yer değiştirme bileşenleri için cevap yüzeyi fonksiyonunun güvenilir sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. En doğrultusundaki Poisson oranı ise modelin zayıf tahmin yeteneğine sahip olduğu bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Ancak bazı yönlerde (örneğin en doğrultusundaki Poisson oranı) iyileştirmeye açık alanlar mevcuttur. Bu farklar, ileride farklı optimizasyon yöntemlerinin kullanılmasıyla giderilebilecektir.

3.3. Optimum Değerler

Çok amaçlı genetik algoritma (MOGA), birçok mühendislik optimizasyon yöntemlerinden biri olan rehberli rastgele arama yöntemidir. Çözüm alanının çeşitli bölgelerini keşfetme yeteneği

sayesinde çok amaçlı optimizasyon içeren problemleri çözmek için uygundur. MOGA, optimum alan doldurma yöntemini kullanarak yanıt yüzeyinden ilk popülasyonunu oluşturmaktadır. Daha sonra çaprazlama ve mutasyon uygulanarak bir sonraki popülasyon oluşturulmaktadır. Çaprazlama olasılığı ve mutasyon olasılığı sırasıyla %98 ve %1'dir. Yüksek çaprazlama oranı erken yakınsama problemini en aza indirmektedir. Düşük bir mutasyon oranı, optimize edicinin yerel maksimumlara veya minimumlara düşmesini önlemektedir. Çaprazlama, bir sonraki nesil için yeni kromozomlar oluşturmak üzere iki kromozomu birleştirirken mutasyon ise gen değerlerini değiştirmektedir. Mutasyona uğramış bir kromozom, genetik algoritmayı daha iyi bir çözüme doğru yönlendirme potansiyeline sahiptir. Bu popülasyon değiştirme süreci, izin verilen maksimum Pareto yüzdesine ulaşılan kadar devam etmektedir. Bu, istenen Pareto noktalarının sayısının, iterasyon başına örnek sayısına oranıdır. Bu çalışmada, izin verilen maksimum Pareto yüzdesi %70 olarak belirlenmiştir. Bu yüzdeye ulaşıldığında optimizasyonun yakınsadığı kabul edilmektedir. Çoğu optimizasyon problemi için genellikle 0,55 ile 0,75 arasında seçilmektedir.

MOGA optimizasyonunda başlangıç aşamasında 2000 örnek üretilmiş, her iterasyonda 400 örnek değerlendirilmiştir. Toplam iterasyon limiti 20 olarak belirlenmesine rağmen, en fazla 9 iterasyon sonunda çözümün yakınsamaya ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu süreçte toplam 4346 genetik değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, optimum çözüme en yakın olabilecek 3 aday çözüm belirlenmiştir. Optimizasyon sürecindeki yakınsama davranışı Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6:

Optimizasyon esnasında genetik algoritmanın yakınsama grafiği

Optimizasyon sonunda 3 aday nokta Tablo 5'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Tablo 5. Önerilen aday noktalar

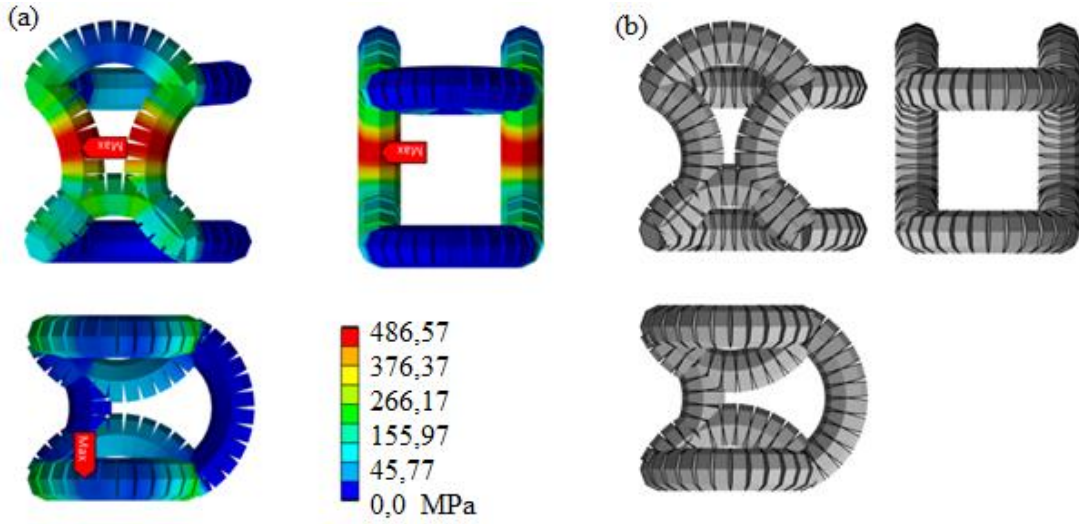
Değişkenler		Aday nokta 1	Aday nokta 2	Aday nokta 3
Giriş	Yarıçap (mm)	11,0970	12,222	13,371
	Uygulanan eksenel yer değiştirme (mm)	0,02829	0,0973	0,0463
Çıkış	Gerilme (MPa)	489,970	153,60	238,16
	v_{en}	-0,0035	-0,0034	-0,0035
	$v_{genişlik}$	-0,7150	-0,7180	-0,7190

Aday noktalardan "Aday nokta 1" seçilmiş olup, bu değerler hedeflerin dengeli bir şekilde sağlandığını ifade etmektedir. Bu sonuçlar, özellikle yarıçaptaki küsurat nedeni ile sanayide uygulanabilir nitelikte değildir. Yani olağan endüstriyel üretim tezgâhları ile makul maliyetle, tam olarak 0,097 mm değerindeki bir boyutu üretebilmek henüz mümkün değildir. Optimizasyonla belirlenen aday noktalar, cevap yüzeyi fonksiyonlarıyla elde edilmiş ve simülasyonlar aracılığıyla doğrulanmıştır. Küsuratlı boyutların imalat makinelerince karşılanması mümkün olmadığından, bu değerler üste yuvarlama yöntemiyle düzenlenmektedir. Tablo 6 ise seçilen noktanın üretilebilmesi mümkün olan değerlere yuvarlanmış hâlini göstermektedir.

Tablo 6. Seçilen aday noktanın üretilebilir olan değerlere yuvarlanması

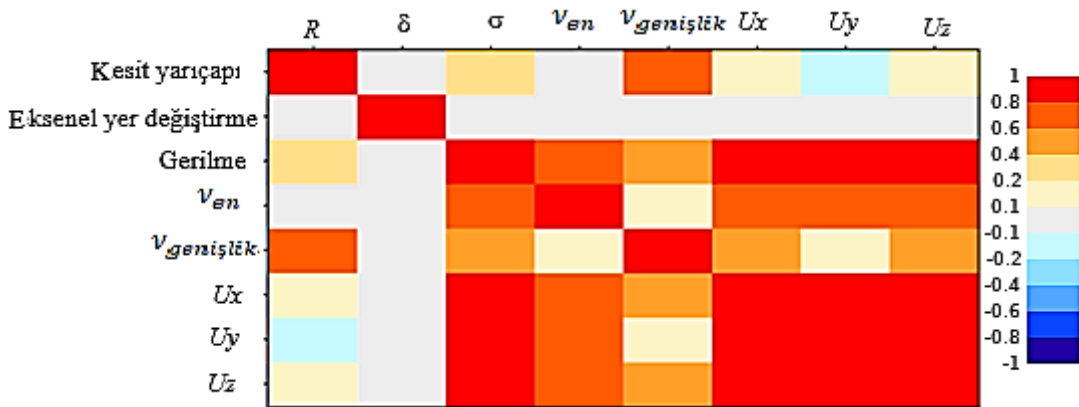
Parametreler		Üretilebilir değerler
Giriş	Yarıçap (mm)	11,1000
	Uygulanan aksenal yer değiştirme (mm)	0,02830
Çıkış	Gerilme (MPa)	486,510
	v_{en}	-0,0035
	$v_{genişlik}$	-0,7150

Seçilen aday noktanın üretilebilir olan değerlere yuvarlanması neticesinde elde edilen nihai değerlerin, geometri üzerine uygulanması ve analizin tekrar edilmesi sonucunda elde edilen deformasyon ve gerilme dağılımları Şekil 7 (a)'da verilmiştir. Sabit mesnetlenmiş bölgede, olması gerektiği gibi, deformasyon değeri sıfırdır. Hesaplanan 486,51 MPa düzeyindeki gerilmenin, Ti-6Al-4V alaşımının akma sınırlarının altında olduğu görülmektedir. Şekil 7 (b)'de ise nihai değerlere sahip hücrenin ağ örülmüş görünümü sunulmakta, analizde kullanılan elemanların boyutları ve dağılımı detaylandırılmaktadır.

**Şekil 7:**

Seçilen DP noktasının verdiği (a) gerilme ve (b) ağ örülmüş görüntüsü

Şekil 8'de Spearman korelasyon matrisi verilmiş olup parametrelerin birbiriyle olan ilişkilerinin belirlenmesinde önemli bir araçtır.

**Şekil 8:**

Spearman'ın korelasyon matrisi (R , aksenal yer değiştirme, gerilme, $v_{genişlik}$, v_{en} , U_x , U_y , U_z)

Korelasyon matrisinin incelenmesi sonucunda, kesit yarıçapı ile eksenel yer değiştirme arasında orta düzeyli pozitif korelasyon saptanmıştır ve bu iki girdinin Poisson oranı ile maksimum gerilme üzerinde anlamlı etkilere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, maksimum gerilme ile maksimum yer değiştirmeler arasında yüksek pozitif korelasyon gözlemlenmiştir; bu durum, yer değiştirme miktarının artmasıyla gerilme düzeyinin yükseldiğini göstermektedir. Buna karşın, Poisson oranlarının bazı eksenel veya enine yer değiştirmelerle negatif ilişki sergilediği görülmektedir. Sonuç olarak, kesit boyutu ve yer değiştirmelerin gerilme ile Poisson oranı değerlerinde kritik önem taşıdığı anlaşılmaktadır.

3.4. Tartışma

Bu çalışmada, kübik kiral kafes yapılarında yaygın olarak kullanılan bir birim hücre incelenmiştir. Literatürde benzer çalışmalar incelendiğinde, Ha ve diğerleri (2016) negatif Poisson oranına sahip izotropik kiral kafesler geliştirmiş ve sonlu eleman analizi ile mekanik özellikleri incelemiştir (Ha ve diğ. 2016). Novak ve diğerleri (2019), Ti-6Al-4V alaşımından üretilen kiral özetik hücrelerin yarı statik ve dinamik yüklemeler altındaki davranışını analiz etmiştir (Novak ve diğ. 2019). Malzeme seçimi açısından mevcut çalışma ile benzerlik göstermekle birlikte, mevcut çalışmada optimizasyon sürecinde genetik algoritmanın kullanılması ile daha spesifik sonuçlara ulaşılmıştır. Kiral mikro yapıli kafeslerde Poisson oranının negatif bir değer olduğu ifade edilmiştir (Vasiliev ve Pavlov, 2021). Bostancıoğlu ve Kacar (2024) ise 266 MPa çekme ve 233 MPa basma gerilmelerine dayanıklı bir tasarım yapmışken mevcut çalışma 486,51 MPa gerilmeye dayanabilmektedir. Kırar (2025) ise modifiye ve orijinal yapının dayanımı için sırasıyla ~177 MPa ve ~169 MPa değerlerine ulaşmışlardır.

Sonuç olarak, literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslandığında, bu çalışmanın yenilikçi yönü, genetik algoritma kullanılarak kiral kafes yapılarının optimizasyonunun yapılması ve bu sayede daha spesifik ve uygulanabilir sonuçlar elde edilmesidir. Ayrıca, bu çalışma, kiral yapıların mekanik dayanımını artırmak ve negatif Poisson oranını optimize etmek için önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada yapılan inceleme ve elde edilen sonuçların bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. İlk olarak, kullanılan malzeme ve geometrik parametrelerin belirli bir aralıkta incelenmiştir. Bu da sonuçların genelleştirilebilirliğini kısıtlamaktadır. Farklı malzemeler ve daha geniş bir parametre aralığı ile yapılacak müteakip çalışmalar, sonuçların daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır. İkinci olarak, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan simülasyonlar, belirli varsayımlar ve ideal koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Gerçek dünya uygulamalarında, malzeme kusurları, üretim toleransları ve çevresel etkiler gibi faktörler, yapıların performansını etkileyebilmektedir. Üçüncü olarak, bu çalışmada genetik algoritma kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Farklı optimizasyon yöntemleri de mevcuttur. Bu yöntemlerin başarısının kıyaslanması ise gelecek çalışma potansiyeline sahiptir. Son olarak, çalışmada sadece statik yükleme koşulları altında yapılan analizler yer almaktadır. Dinamik yükleme koşulları, titreşim, yorulma ve darbe gibi durumlardaki yapısal cevaplar ayrıca incelenmelidir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, kiral kafes içeren yapılarda yaygın olarak kullanılan bir birim hücre analiz edilmiştir. Yapılan simülasyon ve optimizasyon çalışmaları sonucunda, hücrenin mekanik dayanımı ve deformasyon davranışları başarılı bir şekilde ortaya konmuştur. Yapısal analizler, Ti-6Al-4V malzemesi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ankastre mesnetlenmiş bir uç ile eksenel yer değiştirmeye maruz bırakılan serbest uç arasındaki gerilme ve Poisson oranları hesaplanmıştır. Optimizasyon süreci, genetik algoritma kullanılarak yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar, hücre geometrisinin ve eksenel yer değiştirmenin maksimum dayanım üzerindeki

etkilerini ortaya koymaktadır. Optimum kesit yarıçapı 11,1 mm olarak belirlenmiştir. Bu değerler, tasarım hedefleri ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Ancak, pratik uygulamalarda üretilebilirlik açısından belirli yuvarlama işlemlerinin gerekebileceği öngörülmektedir. Bu boyutlarda, yapının kütlesi 638,95 gram olup yapı 486,51 MPa gerilmeye dayanabilmektedir. Poisson oranı $-0,00349$ ve genişlikte ise $-0,715$ olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, yapının ökzetik davranış sergilediğini ve negatif Poisson oranına sahip olduğunu göstermektedir. Simülasyonlar sonucunda, eksenel yer değiştirme miktarının artışı ile maksimum gerilme arasında güçlü bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Regresyon analizleri, yer değiştirme değerinin belirli aralıklarda önemli değişikliklere neden olduğunu ve bu durumun maksimum gerilme üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, kiral bir birim hücrenin optimizasyonu ve yapısal analizi açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, ilerleyen araştırmalarda farklı malzemeler ve dinamik yükleme koşulları altında yapılacak analizler için bir temel teşkil etmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Cem Yılmaz bu çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, makale taslağının oluşturulması, simülasyon, sayısal değerler, son onay ve tam sorumluluk, veri toplama, analizi ve yorumlanması ve İlyas Kacar ise bu çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesi hususlarında katkı sağlamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları değerli katkılardan dolayı editör, hakem ve emeği geçenlere içten teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

1. Bostancıoğlu Y. ve Kacar İ. (2024). Design and optimisation of a chiral lattice structure, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 8(2): 202-213. DOI: 10.46519/ij3dptdi.1452986
2. Cerdán, L., Zundel, L., ve Manjavacas, A. (2023). Chiral lattice resonances in 2.5-dimensional periodic arrays with achiral unit cells, *ACS Photonics*, 10(6), 1925–1935. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.3c00369>
3. Fecher, G. H., Kübler, J., ve Felser, C. (2022). Chirality in the solid state: Chiral crystal structures in chiral and achiral space groups, *Materials (Basel)*, 15(17), 5812. <https://doi.org/10.3390/ma15175812>
4. Ha, C.S., Plesha, M.E. ve Lakes, R.S. (2016). Chiral three-dimensional isotropic lattices with negative Poisson's ratio. *Physica status solidi B*, 253: 1243-1251. <https://doi.org/10.1002/pssb.201600055>
5. Kırar E., (2025). Modifiye edilmiş reentrant ökzetik tasarımın çekme yükü altında incelenmesi, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 10(1): 26-35, (2025). DOI: 10.46578/humder.1600321

6. Kim, D.-S., Kim, M., Seo, S., ve Kim, J.-H. (2023). Nature-inspired chiral structures: Fabrication methods and multifaceted applications, *Biomimetics*, 8(7), 527. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8070527>
7. Liu, X. N., Hu, G. K., Sun, C. T., ve Huang, G. L. (2011). Wave propagation characterization and design of two-dimensional elastic chiral metacomposite, *Journal of Sound and Vibration*, 330(11), 2536–2553. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.12.014>
8. Noori, M., Topaloğlu, N., Tem  , M., ve T rker, H. T. (2019). Ba lang   e rilik kusurlarının mesnetlenme durumu ve mod l sayısına g re d zlemsel  ift tabakalı uzay kafes sistemlerin davranı ına etkisi, *Uluda  University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(3), 31–46. <https://doi.org/10.17482/uumfd.598130>
9. Novak, N., Mauko, A., Ulbin, M., Krstulovi -Opara, L., Ren, Z., and Vesenjak, M. (2022). Development and characterisation of novel three-dimensional axisymmetric chiral auxetic structures, *Journal of Materials Research and Technology*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.025>
10. Ruan, H., Jiahong, H., ve Dong, L. (2021). Wave propagation characterization of 2D composite chiral lattice structures with circular plate inclusions, *Engineering Structures*, 264, 114466. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114466>
11. Spadoni, A., Ruzzene, M., Gonella, S., ve Scarpa, F. (2009). Phononic properties of hexagonal chiral lattices, *Wave Motion*, 46, 435–450. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2009.04.002>
12. Sulis, S., Rakhimzhanova, A., ve Brun, M. (2022). Filtering properties of discrete and continuous elastic systems in series and parallel, *Applied Sciences*, 12(8), 3832. <https://doi.org/10.3390/app12083832>
13. S vari, F., Akg n, M., Eren, R., ve Yurdakul, T. (2021). Dokuma kuma ların gerilme altında  ekil de i tirme davranı larının g r nt  i leme y ntemiyle tespiti, *Uluda  Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 661–678. <https://doi.org/10.17482/uumfd.945060>
14. T rko lu,  . K., Bayram, T., ve Yazıcı, M. (2024). Mechanical properties of 3D printed continuous carbon fiber/polypropylene lattice core composite sandwich structure, *Uluda  University Journal of The Faculty of Engineering*, 29(3), 863–880. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1497273>
15. Vasiliev, A., ve Pavlov, I. (2021). Models and parameters of Cosserat hexagonal lattices with chiral microstructure, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1008, 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1008/1/012017>
16. Yılmaz, C., ve Kacar,  . (2024). Farklı en/boy oranına sahip dörtgensel kesitli bir kiral ökzetik hücresel yapının tasarım ve optimizasyonu. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(23), 265-282. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1440934>